Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 14, No. 1, Apr. May. 2018, p. 119- 131

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 14، شماره 1، فروردین-اردیبهشت 1397 ص.131-119

# اثر فرآیند تغلیظ بر خصوصیات رئولوژیکی و فیزیکوشیمیایی آبلیمو

علی معتمدزادگان[1]* - الهه امیدبخش امیری[2]- محبوبه جمشیدی[2]- تندیس خسروی‌راد[3]

تاریخ دریافت: 1395/07/17
تاریخ پذیرش: 1396/02/18

## چکیده

در عملیات صنعتی، محصول تحت تاثیر دامنه‌ای از نرخ‌های برشی قرار می‌گیرد، بنابراین، شناخت تغییرات در رئولوژی با تغییرات دما، فرکانس و نرخ‌های برشی برای طراحی تجهیزات عملیات مورد نیاز است. از آبلیمو در صنعت غذا به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. اطلاعات رئولوژیکی و فیزیکوشیمیایی می‌تواند در افزایش مقیاس و بهینه‌سازی فرآیند، حمل و نقل و نگهداری کنسانتره لیمو مهم باشد. هدف از این مطالعه بررسی رئولوژی و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کنسانتره آبلیمو تولید شده با روش تغلیظ تحت خلا می‌باشد. فرآیند تغلیظ نمونه آبلیمو تا غلظت‌های 25، 35، 45، 55 و 65 درجه بریکس انجام گردید. میزان مواد جامد محلول، pH، اسیدیته و رنگ، رفتار جریانی و ویسکوالاستیسیته تابع کرنش، فرکانس و دما بررسی شد. مقایسه میانگین‌ها با روش تفاوت حداقل معنی‌دار صورت گرفت. با افزایش بریکس، pH کاهش و اسیدیته افزایش یافت. افزایش غلظت موجب کاهش پارامتر $L^*$ و $b^*$ و افزایش در پارامتر $a^*$ شده است. نمونه کنترل و نمونه‌ها با بریکس 25 و 35 رفتار نیوتونی اما نمونه‌ها با بریکس 45، 55 و 65 رفتار رقیق‌شونده با برش داشتند و برازش مناسبی با مدل کراس نشان دادند. این سه نمونه رفتار تیکسوتروپ داشته و با افزایش بریکس، وابستگی به زمان بیشتر شد. در کل دامنه کرنش و فرکانس مورد مطالعه، مقادیر مدول ویسکوز در کلیه نمونه‌ها بیشتر از مقادیر الاستیک بوده است و هیچ برخوردی میان دو مدول مشاهده نشد. در کل دامنه دمایی مورد مطالعه، ویژگی ویسکوز برجسته‌تر از ویژگی الاستیک بود. مدول کمپلکس و ویسکوزیته کمپلکس به‌ترتیب برای نمونه 45 ، 55 و 65 افزایش یافت. نمونه کنسانتره آبلیمو یک ماده رقیق وتیکسوتروپ بوده، ژلی تشکیل نداد و رفتار نمونه‌ها مایع ویسکوالاستیک بود. با افزایش بریکس، اگرچه، مقاومت به نرخ های برشی بالا افزایش می یابد اما توانایی در بازیافت ساختار تخریب شده در اثر حرارت کاهش می یابد.

**واژه‌های کلیدی:** آبلیمو، خصوصیات فیزیکوشیمیایی، خصوصیات رئولوژیکی

## مقدمه

لیمو ترش میوه رسیده گیاه *Citrus Limonume* از خانواده *Rotaceae* می‌باشد. این گیاه اولین بار در کشورهای چین و هندوستان پرورش یافته و به تدریج به سایر کشورها راه یافته است. در ایران نیز انواع مختلف آن در شمال و همچنین در جنوب به‌طور گسترده‌ای کشت می‌شود (زرگری، 1368). آبلیمو حاوی فلاوانون‌ها، فلاوونوئیدها و گلوکوسید فلاوون‌ها می‌باشد (Caristi *et al.*, 2003). علاوه بر این، آبلیمو دارای حدود ٪ 6- 5 اسید سیتریک می‌باشد که به آن مزه ترشی را می‌دهد و همچنین، غنی از اسید آسکوربیک (ویتامین C)، روغن‌های فرار، پکتین، مواد معدنی، قندها، پلی‌ساکاریدها، کاروتنوئیدها و لیمونوئید تلخ می‌باشد (Ranganna *et al.*, 1983). آبلیمو از زمان‌های زیادی به‌عنوان عامل درمان‌کننده استفاده و به دلیل داشتن خصوصیات ضدعفونی کننده، پادزهری برای سموم مختلف بوده و در درمان بیماری‌های مختلفی از قبیل آسکوروی (کمبود ویتامین C)، سرماخوردگی و سنگ کلیه به‌کار گرفته شده است (Touhami *et al.*, 2007).

آبمیوه مهمترین محصول تهیه شده از میوه است (Ibarz *et al.*, 1989) که فرآیندهای تجاری شامل استریلیزاسیون، پاستوریزاسیون یا تبخیر جهت افزایش عمر نگهداری آن انجام می‌شود (Chin *et al.*, 2009). تهیه کنسانتره آب میوه در قالب آب‌میوه خشک یا کنسانتره منجمد به‌عنوان یک روش جایگزین برای حفظ مواد مغذی بیشتر و مواد فرار میوه‌های تازه است. آب‌میوه به‌دست آمده از طریق حذف بخش عمده‌ای از محتوای آب با استفاده از تبخیر تحت خلاء یا انجماد به‌عنوان کنسانتره شناخته می‌شود (Lozano, 2006). مواد مغذی و طعم در کنسانتره آب میوه‌ها از اهمیت قابل توجهی برخوردار

1 و 2- به‌ترتیب دانشیار و دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.
3- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی.
(* - نویسنده مسئول: (Email: amotgan@yahoo.com
DOI: 10.22067/ifstrj.v1396i0.59409

است. از دیگر موارد مهم در تهیه کنسانتره‌ها ارزیابی ویسکوزیته، غلظت و دما در طی فرآیند است (Chin *et al.*, 2009). ویژگی‌های رفتار جریان آب‌میوه فرآیند شده در تعیین توان پمپ و اندازه لوله‌ها، طراحی تجهیزات فرآیند مانند تبادل کننده حرارت، مخلوط کن، پرکن‌ها و غیره بسیار مهم است (Lozano, 2006; Kimball *et al.*, 2004). برای مثال در عملیات طراحی، تشخیص جریان از نوع آرام یا توربولانت باید انجام شود (Gratão *et al.*, 2006). اگر به فرض جریان نیوتنی ساده محسوب شود، تخمین زمان هلدینگ اشتباه می‌گردد (Lozano, 2006). علاوه بر این، ویژگی‌های رئولوژی در حمل و نقل نیز باید مورد توجه قرار گیرد. در اواپراتورهای مدرن از نرخ‌های برشی بالا جهت کاهش ویسکوزیته، افزایش سرعت انتقال حرارت و درنتیجه ذخیره انرژی استفاده می‌شود. افزایش ویسکوزیته کنسانتره داخل اواپراتور موجب سوختن محصول و کاهش بازدهی محصول و انرژی می‌شود. ویسکوزیته کنسانتره تحت تاثیر دما و غلظت می‌باشد (Magerramov *et al.*, 2007). بنابراین، درک درستی از چگونگی تاثیر تبخیر بر ویسکوزیته در غلظت و دماهای مختلف مورد نیاز است. علاوه بر این، مدل‌های ریاضی جایگزین مناسب و کاربردی برای آزمایشات است.

تاکنون بررسی‌های زیادی بر روی اثرات دما و غلظت بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی تعدادی از آب‌میوه‌ها مانند هلو (Avila and Silva, 1999)، آناناس (Rattanathanalerk *et al.*, 2005)، نارنج (نصیری و همکاران، 1393) پرتقال (Jesus *et al.*, 2007)، انبه (Dak *et al.*, 2007) و کیوی (Goula and Adamopoulos, 2012) انجام شده است. تخریب حرارتی رنگ پوره هلو مدل‌سازی و مشخص شد، تخریب رنگ هلو می‌تواند شاخصی برای شرایط فرآیند استریلیزاسیون باشد (Avila and Silva, 1999). در مطالعه اثر تیمار حرارتی بر افت کیفیت آب آناناس، پارامترهای رنگ هانتر و تشکیل هیدروکسی متیل فورفورال بررسی شدند. نتایج نشان داد، دمای فرآیند اثر قابل ملاحظه‌ای بر تغییر رنگ آب آناناس دارد (Rattanathanalerk *et al.*, 2005). در بررسی رئولوژی و برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کنسانتره آب نارنج تغلیظ شده تحت خلا، نمونه‌ها رفتار غیرنیوتنی رقیق‌شونده با برش را نمایش دادند. میزان ویتامین C در اثر تغلیظ کاهش پیدا کرد و رنگ فرآورده نیز متأثر از غلظت و دمای تغلیظ محصول بود (نصیری و همکاران، 1393). با تغلیظ آب پرتقال با استفاده از اسمز معکوس، قند و ویتامین C نسبت به آب پرتقالی که تنها در اثر فشردن پرتقال به‌دست آمد، بیشتر حفظ شد. آب پرتقال تغلیظ شده با اسمز معکوس، اسیدیته، ویتامین C و ویسکوزیته بیشتری در نتیجه پالپ بیشتر و میزان مواد جامد محلول بیشتر داشته است (Jesus *et al.*, 2007). خصوصیات جریانی آب انبه در دماها و غلظت‌های مختلف مواد جامد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آب انبه در همه شرایط آزمون سودوپلاستیک/ رقیق‌شونده با برش می‌باشد (Dak *et al.*, 2007). نتایج بررسی خصوصیات رئولوژیکی آب کیوی در غلظت‌های مختلف مواد جامد و در دماهای مختلف نشان داد، نمونه‌ها رفتار سودوپلاستیک دارند و با مدل پاورلا برازش شدند. در تنش‌های برشی پایین نمونه‌ها رفتار تیکسوتروپیک نشان دادند که در تنش‌های بالاتر به رئوپکتیک تغییر یافت (Goula and Adamopoulos, 2012).

با توجه به اینکه در صنعت ایران از آبلیمو جهت چاشنی غذا استفاده گسترده‌ای می‌شود، هدف از این مطالعه بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و رئولوژی کنسانتره آبلیمو تولید شده با روش تغلیظ تحت خلا می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

لیموترش (*Citrus limon var Eureka*) از بازار محلی ایران تهیه شد. بعد از پوست‌گیری، آب لیمو استخراج شد. بعد از صاف کردن توسط فیلتر پارچه‌ای، تبخیر تحت خلا با دستگاه تبخیرکننده چرخشی تحت خلاء (TAT-94-1046، طیف آزما طب، ایران) در دمای 65°C انجام گرفت. فرآیند تغلیظ تا غلظت‌های 25، 35، 45، 55 و 65 درجه بریکس از نمونه اولیه با بریکس 7 انجام گردید. کنسانتره‌های تولیدی تا زمان آزمایشات، در یخچال با دمای 4 °C نگهداری شدند.

### آزمون‌های فیزیکوشیمیایی

### اندازه‌گیری مواد جامد محلول

طی فرآیند تغلیظ میزان مواد جامد محلول بر حسب بریکس با استفاده از دستگاه رفراکتومتر (A-کروئس، DR 301-95، آلمان) و در دمای 20°C اندازه‌گیری شد (استاندارد ملی شماره 2685).

### اندازه‌گیری pH

اندازه‌گیری pH نمونه‌ها به کمک pHمتر (سنا pH/ دماسنج، ایران) انجام شد (استاندارد ملی شماره 2685).

### اندازه‌گیری اسیدیته

اسیدیته مطابق با استاندارد ملی ایران (شماره 2685) و با روش تیتراسیون با سود 1/. نرمال انجام و اسیدیته بر حسب اسید سیتریک (بر حسب گرم در صد گرم) گزارش گردید (استاندارد ملی شماره 2685).

### آزمون رنگ‌سنجی

به‌منظور بررسی پارامترهای رنگی نمونه‌ها از دستگاه رنگ‌سنج (ابزارکاران فن پویای شمال، ایران) استفاده شد. فاکتورهای $L^*$، $a^*$ و

$b^*$ در هر نمونه گزارش شد.

### آزمون‌های رئولوژی

کلیه آزمون‌های رئولوژی توسط دستگاه رئومتر آنتون پار (فزیکا MCR 301، آنتون پار، اتریش) انجام شد. ژئومتری مورد استفاده double gap بوده و فاصله بین صفحه‌ها برای تمامی آزمون‌ها روی zerogap و به‌طور دقیق 0/02 میلی‌متر تنظیم شد. تمامی آزمون‌ها در دمای کنترل شده $20\ ^{\circ}C$ انجام شدند.

### آزمون رفتار جریانی

در این آزمون نمونه‌ها تحت نرخ برش $S^{-1}$ 0/001 تا 300 قرار می‌گیرند. این آزمون در 2 مرحله انجام شد. ابتدا نرخ برشی از $S^{-1}$ 0/001 تا 300 افزایش یافت. در مرحله دوم نرخ برشی از 300 تا 0/001 کاهش یافت. در این آزمایش وابستگی ویسکوزیته ظاهری به نرخ برشی تعیین شد. داده‌های ویسکوزیته در سه نرخ برشی در هر دو مرحله افزایشی و کاهشی اندازه گرفته شد. در این آزمون پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های نیوتنی، بینگهام، کراس و هرشل بالکی، مورد بررسی قرار گرفت.

(1) مدل نیوتنی $y=ax$

y: تنش برشی (Pa)، x : نرخ برشی ($s^{-1}$)، a: ویسکوزیته(Pa.s)

(2) مدل بینگهام $y=a+bx$

y: تنش برشی (Pa)، x : نرخ برشی ($s^{-1}$)، a: تنش تسلیم (Pa)، b: ویسکوزیته(Pa.s)

(3) مدل کراس

$$y=\frac{y_0-y_{\inf}}{1+(c.x)^p}+y_{\inf}$$

x: نرخ برشی ($s^{-1}$)، y: ویسکوزیته (Pa.s)، $y_0$: ویسکوزیته در نرخ برشی صفر[1](Pa.s)، $y_{inf}$: ویسکوزیته در نرخ برشی بی‌نهایت[2](Pa.s)، c: ثابت زمان (s)، p: توان بدون بعد (Khalili Garakani *et al.*,2011).

(4) مدل هرشل بالکی $y=a+bx^p$

x: نرخ برشی ($s^{-1}$)، y: تنش برشی (Pa)، a: تنش تسلیم (Pa)، b: ضریب قوام یا ثابت مدل هرشل بالکی: ($pa.s^n$)، p: اندیس جریان (بدون بعد) کاهش نرخ برشی در مرحله دوم به جهت تعیین رفتار وابستگی به زمان انجام شد. فضای میان منحنی بالارونده و منحنی پایین‌رونده را ناحیه هیسترسیس می‌نامند. این ناحیه توسط دستگاه رئومتر و با نرم‌افزار رئوپلاس محاسبه شد. مساحت حلقه هیسترسیس (pa/s) طبق اطلاعات نرم‌افزار، مقدار بازیافت ساختار را نشان می‌دهد. در واقع می‌توان گفت، اعداد منفی به‌دست آمده از نرم‌افزار، نشان‌دهنده رفتار رئوپکتیک و اعداد مثبت نشان‌دهنده رفتار تیکسوتروپیک است.

### آزمون روبش کرنش

نمونه‌ها در این آزمون تحت کرنش 0/01 تا 100 درصد در فرکانس ثابت 1 هرتز قرار گرفتند. اولین هدف از انجام این آزمون تعیین محدوده خطی ویسکوالاستیک است. در مرحله بعدی وابستگی مدول کمپلکس و ویسکوزیته کمپلکس به کرنش نشان داده می‌شود.

### آزمون روبش فرکانس

در این آزمون نمونه‌ها تحت کرنش ثابت 0/1درصد از فرکانس 0/1 تا 100 هرتز مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های حاصل از آزمون با مدل پاورلا برازش شد.

(2) مدل پاورلا $G''=aw^b$

G″: مدول ویسکوز (Pa)، w: فرکانس زاویه‌ای (rad/s)، a: ثابتی است که وابستگی مدول ویسکوز به فرکانس را نشان می‌دهد، b به توان فرکانس اشاره می‌کند.

### آزمون روبش دما

در این آزمون تحت کرنش 0/1درصد، فرکانس ثابت 1 هرتز، دما از $10^{\circ}C$ تا 70 افزایش و سپس از 70 به 18/33 درجه کاهش یافت. سرعت تغییر دما، $5^{\circ}C$ در هر دقیقه بوده است. در این آزمون وابستگی مدول کمپلکس و ویسکوزیته کمپلکس به دما نشان داده می‌شود.

### تجزیه و تحلیل آماری داداه‌ها

کلیه آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و حداقل با سه تکرار انجام شدند. به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار آماری SPSS 25 استفاده گردید. تمامی مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل تفاوت‌های معنی‌دار (LSD) در سطح معنی‌دار 5 درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

### خصوصیات فیزیکوشیمیایی

میزان pH و اسیدیته نمونه‌ها در بریکس‌های مختلف اندازه‌گیری و با نمونه شاهد مقایسه شدند. نتایج در جدول 1 گزارش شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش بریکس pH کاهش و اسیدیته افزایش یافته است ($p<0/05$). میزان pH بین 2/57-1/5

1 Zero shear viscosity
2 Infinite shear viscosity

می‌باشد،که نشان‌دهنده این است، آبلیمو در بریکس‌های مختلف اسیدی می‌باشد و بریکس‌های بالاتر که pH کمتری دارند بسیار اسیدی هستند. در آب یک نوع سیب آفریقایی هم مشاهده شده است که با افزایش مواد جامد در آب‌میوه، pH کاهش و اسیدیته افزایش یافت. هرچند کاهش pH معنادار نبوده است (Awol *et al.*, 2013). به‌منظور بررسی اثر تغلیظ بر رنگ نمونه آبلیمو، پارامترهای رنگ هانتر به‌عنوان شاخص انتخاب و بررسی شدند که *L (روشنایی)، *a (قرمزی- سبزی) و *b (زردی- آبی) می‌باشد. میزان پارامترهای رنگ هانتر نمونه شاهد و نمونه‌ها با بریکس‌های مورد مطالعه در جدول 1 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش غلظت موجب کاهش پارامتر *L و *b و افزایش در پارامتر *a شده است ($p<0/05$). کاهش پارامتر *L نشان‌دهنده تیره شدن نمونه آبلیمو می‌باشد. همچنین، در نمونه شاهد پارامتر*a منفی است که نشان‌دهنده رنگ سبز می‌باشد و با افزایش غلظت عدد مثبت شده و به سمت قرمزی رفته است و پارامتر *b نیز با افزایش غلظت کاهش، بنابراین، زردی کاهش یافته است. این نتایج نشان‌دهنده این است که نمونه‌ها در معرض قهوه‌ای شدن قرار گرفته‌اند. قهوه‌ای شدن آنزیمی در این مطالعه به دلیل حساسیت آنزیم‌ها به حرارت‌های بالاتر از 50 درجه سانتی‌گراد می‌تواند نادیده گرفته شود (Martinez and Whitaker,1995). قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی یکی از عوامل مهم در تغییر رنگ فرآورده‌های میوه‌ای می‌باشد. در مطالعه اثر فرآیند حرارتی بر آب آناناس مشاهده شد که تشکیل هیدروکسی‌متیل‌فورفورال با افزایش زمان حرارت‌دهی به‌صورت خطی افزایش یافته است و در درجه حرارت‌های بالاتر، مقادیر بیشتری مشاهده شد. تشکیل هیدروکسی‌متیل‌فورفورال و رنگدانه‌های قهوه‌ای نشان‌دهنده این است که واکنش قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی در طول فرآیند رخ می‌دهد (Rattanathanalerk *et al.*, 2005). در مطالعه تغییرات رنگ پوره هلو که تحت تاثیر حرارت قرار گرفته‌اند نتایج نشان داد که پوره هلو تیره‌تر شده‌اند و پارامتر *L کاهش و *a افزایش یافته است. همچنین از زردی (کاهش پارامتر*b) کاسته شده است. آنها نتیجه گرفتند که دلیل اصلی تغییر رنگ، تجزیه کاروتنوئیدها و قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی (میلارد) می‌باشد (Avila and Silva, 1999). در مطالعه بر روی کنسانتره آب نارنج هم نتایج نشان داد که در تمامی دماهای مورد مطالعه با افزایش غلظت کنسانتره روشنایی کاهش یافته است (نصیری و همکاران، 1393). همچنین، در مطالعه تغلیظ آب پرتقال با استفاده از روش اسمز معکوس نیز نشان‌دهنده این مطلب بود که به دلیل خروج آب از آب میوه، روشنایی آب میوه کاهش می‌یابد (Jesus *et al.*, 2007). بنابراین، قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی میلارد (تشکیل هیدروکسی‌متیل‌فورفورال و پلیمریزاسیون آن) و تخریب رنگدانه‌ها می‌تواند عامل مهمی در تغییر رنگ باشد اگرچه کاهش میزان رطوبت و افزایش مواد جامد محلول نیز دلیل دیگری برای تیرگی رنگ است.

**جدول 1- میانگین و انحراف معیار برخی از خصوصیات فیزیکو شیمیایی آبلیمو**

| ویژگیها \ نمونه | | شاهد | بریکس 25 | بریکس 35 | بریکس 45 | بریکس 55 | بریکس 65 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | | 2/57[a]±0/02 | 2/34[b]±0/04 | 2/23 [c]±/02 | 2/06[d]±0/07 | 1/73[e]±0/02 | 1/50[f]±0/05 |
| اسیدیته (بر حسب گرم در صد گرم) | | 5/76[a]±0/22 | 14/08[b]±0/31 | 32[c]±0/3 | 43/52[d]±0/25 | 52/48[e]±0/33 | 56/96[f]±0/22 |
| پارامترهای رنگی | L* | 62/76[a]±0/43 | 48/82[b]±0/14 | 31/04[c]±0/52 | 55/42[d]±0/ 66 | 13/97[e]±0/25 | 7/79[f]±0/86 |
| | a* | -6/65[a]±0/13 | 6/12[b]±0/18 | 14/38[c]±0/41 | 10/46[d]±0/37 | 12/86[e]±/30 | 8/09[f]±0/91 |
| | b* | 30/54[a]±0/36 | 26/59[b]±0/75 | 18/8[c]±0/53 | 15/12[d]±0/38 | 8/80[e]±0/18 | 4/8[f]±0/65 |

در هر ردیف داده‌هایی که با حروف کوچک لاتین یکسان مشخص شده‌اند، بر اساس آزمون LSD با یکدیگر تفاوت معنی‌دار ندارند.

داده‌ها میانگین سه تکرار ± انحراف معیار است.

### آزمون‌های رئولوژی

### آزمون رفتار جریانی

با آزمون رفتار جریانی ویژگی‌های رئولوژی نمونه تحت تخریب ساختار بدست آورده شد. ویسکوزیته‌های بدست آمده در هر دو مرحله افزایش نرخ برشی و کاهش نرخ برشی در سه نرخ برشی 0/05، 52/7 و 300 ($s^{-1}$) در جدول 2 گزارش شده است. در هر دو مرحله از آزمون، در هر سه نرخ برشی ویسکوزیته با افزایش بریکس افزایش یافت. با افزایش نرخ برشی، ویسکوزیته نمونه کنترل و نمونه با بریکس 35 در طی افزایش نرخ برشی از 52/7 تا 300 از لحاظ آماری تغییر چشمگیری نشان نداد اما برای سایر نمونه‌ها با افزایش نرخ برشی ویسکوزیته کاهش یافت ($p<0/05$). تفاوت میان ویسکوزیته‌ها نسبت به افزایش یا کاهش نرخ برشی در هر دو مرحله از آزمون، در بریکس‌های بالاتر مشهودتر بود. کاهش ویسکوزیته در طی افزایش نرخ برشی، می‌تواند ناشی از باز شدن پیوندها و جهت یافتگی واحدهای ساختاری باشد (Williams and Phillips,2000). آب‌میوه از فاز محلول یا پالپ پراکنده شده در یک فاز سرم تشکیل شده است. رفتار رقیق‌شونده با برش در کنسانتره‌های آبلیمو می‌تواند به دلیل مواد فاز غیرپیوسته آن از قبیل مواد فیبری باشد در حالیکه آب به‌عنوان فاز پیوسته عمل می‌کند. مواد جامد نامحلول اساسا ترکیبات پروتئینی و

پکتیکی هستند (Augusto *et al.*, 2012). مطالعه Sharma و همکاران در سال (1996) بر خصوصیات رئولوژیکی پالپ گوجه‌فرنگی، نشان داد که پکتین فاکتور مهمی در افزایش ویسکوزیته محصولات غذایی می‌باشد، در حالیکه پروتئین نقش کمتری را ایفا می‌کند (Sharma *et al.*, 1996). بنابراین، یک عامل موثر در این پدیده می‌تواند حضور پکتین در نمونه آبلیمو باشد. در سیستم‌های پلی‌ساکاریدی با افزایش غلظت پلیمر، ویسکوزیته بالاتر می‌رود. همچنین با افزایش نرخ برشی ویسکوزیته کاهش می‌یابد (do Nascimento *et al.*, 2016). پکتین موجود در آبلیمو به‌عنوان یک پلی‌ساکارید می‌تواند نقش موثری در رفتار رقیق‌شونده با برش مشاهده شده در کنسانتره لیمو با غلظت‌های بالا داشته باشد. با بررسی پژوهش‌های پیشین مشاهده شد، قند نیز می‌تواند ویسکوزیته ظاهری را تحت تاثیر قرار دهد. رفتار رقیق‌شونده با برش در حضور غلظت‌های بالاتر قند بیشتر می‌شود. در چنین غلظت‌هایی معمولا انبوهش پلی‌ساکاریدی رخ داده و شبکه سه‌بعدی تشکیل می‌شود. بنابراین انرژی مورد نیاز برای تخریب ساختار شبکه افزایش می‌یابد (Braccini *et al.*, 2005). اما در نمونه‌های حاضر هیچ‌گونه مدرکی برای تشکیل ژل وجود ندارد. در اینجا، افزایش ویسکوزیته در نتیجه افزایش کار مورد نیاز جهت جریان یافتن به دلیل اصطکاک حاصل از حرکت مولکول‌هاست. در واقع افزایش در ویسکوزیته فاز پیوسته منجر به افزایش در نیروی برشی بکار رفته می‌شود.

**جدول 2- میانگین ویسکوزیته (Pa.s) نمونه‌های کنسانتره لیمو در بریکس‌های مختلف در سه نرخ برشی $s^{-1}$0/05، 52/7 و 300**

| بریکس | نرخ برشی 0/05 ($s^{-1}$) | | نرخ برشی 52/7($s^{-1}$) | | نرخ برشی 300($s^{-1}$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | نمودار افزایشی | نمودار کاهشی | نمودار افزایشی | نمودار کاهشی | نمودار افزایشی | نمودار کاهشی |
| 7 (کنترل) | 0/0208$^{Aa}$ | 0/00155$^{Ba}$ | $^{0}$/0013$^{Ca}$ | 0/00132$^{Ca}$ | /00132$^{Ca}$ | 0/00135$^{Ca}$ |
| 25 | 0/0229$^{Ab}$ | 0/00591$^{Bb}$ | 0/00529$^{Cb}$ | 0/00522$^{Cb}$ | 0/00511$^{Db}$ | 0/00509$^{Db}$ |
| 35 | 0/0309$^{Ac}$ | 0/0107$^{Bc}$ | $^{0}$/0108$^{Bc}$ | 0/0108$^{Bc}$ | 0/0105$^{Bc}$ | 0/0105$^{Bc}$ |
| 45 | 0/0415$^{Ad}$ | 0/0314$^{Bd}$ | 0/0284$^{Cd}$ | 0/0283$^{Cd}$ | 0/0267$^{Dd}$ | 0/0267$^{Dd}$ |
| 55 | 0/398$^{Ae}$ | 0/260$^{Be}$ | 0/22$^{Ce}$ | 0/218$^{De}$ | 0/187$^{Ee}$ | 0/186$^{Ee}$ |
| 65 | 1/67$^{Af}$ | 1/27$^{Bf}$ | 0/917$^{Cf}$ | 0/898$^{Df}$ | 0/696$^{Ef}$ | 0/694$^{Ef}$ |

در هر ردیف داده‌هایی که با حروف بزرگ لاتین یکسان مشخص شده‌اند ، بر اساس آزمون LSD با یکدیگر تفاوت معنی‌دار ندارند.

در هر ستون داده‌های نمودار که با حروف کوچک لاتین یکسان مشخص شده اند ، بر اساس آزمون LSD با یکدیگر تفاوت معنی‌دار ندارند.

داده‌های ویسکوزیته در نرخ برشی پایین ( 0/05) ابزار مناسبی برای مطالعه پایداری سیستم‌های کلوئیدی در حالت ساکن است (عالم‌زاده و همکاران، 1388). در هر دو روند، افزایش قابل ملاحظه ویسکوزیته در بریکس 55 و 65 نسبت به 25، 35 و 45 مشاهده شد. بنابراین، در نمونه‌های با بریکس بالا در نتیجه بالا بودن ویسکوزیته ظاهری فاز پیوسته، دو فاز شدن به تاخیر افتاده و بنابراین پایدارتر هستند. از مقادیر ویسکوزیته ظاهری در نرخ‌های برشی میانی (52/7) برای مطالعه ارزیابی حسی و احساس دهانی استفاده می‌شود (عالم‌زاده و همکاران، 1388). در این نرخ برشی نیز، در هر دو روند، افزایش قابل ملاحظه ویسکوزیته در بریکس 55 و 65 نسبت به 25، 35 و 45 مشاهده شد. داده‌های ویسکوزیته در نرخ‌های برشی بالا برای طراحی فرآیندهایی که در آنها نرخ‌های برشی بالا ایجاد می‌شود نظیر محاسبه توان همزن، پمپ، نازل‌ها و فرآیندهایی که شرایط آنها تابع جریان سیال در لوله است (مانند استریلیزاسیون و پاستوریزاسیون) استفاده می‌شود (عالم‌زاده و همکاران، 1388). بنابراین از افزایش ویسکوزیته با افزایش بریکس می‌توان نتیجه گرفت، نمونه‌های با بریکس 65 و سپس 55 مقاومت بالاتری را در برابر فرآیندهایی که در آنها نرخ برشی بالا ایجاد می‌شود، نشان می‌دهند.

داده‌های حاصل از این آزمون، با مدل‌های کاسون، الیس، بینگهام، استوالد، هرشل بالکی، نیوتنی، کراس و کارا برازش شد. بر اساس معیار ضریب تبیین ($R^2$) و جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) می توان بیان کرد که مدل نیوتنی و بینگهام دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشگاهی تنش- کرنش به‌دست آمده برای نمونه کنترل با بریکس 7، و نمونه‌ها با بریکس 25 و 35 بودند. پارامترهای این دو مدل در جدول 3 گزارش شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ویسکوزیته نیوتنی و بینگهام با افزایش بریکس افزایش یافته است ($p<0/05$). کاهش سرم و افزایش غلظت در ذرات فاز پراکنده می‌تواند موجب افزایش سطح تماس بین ذرات شده و اثرات متقابل بین آنها را افزایش دهد. اما میان تنش تسلیم بینگهام نمونه‌ها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد($p<0/05$). موادی که دارای تنش تسلیم هستند در نرخ‌های برشی پایین‌تر از تنش تسلیم خاص خود، سخت هستند در حالی که در مقادیر بالاتر آن تنش تسلیم، به‌عنوان یک سیال پاورلا هستند (Rao, 2014). مقادیر بالاتر تنش تسلیم نشان می‌دهد که سیال رفتار شبه‌ژل دارد. یعنی ماده قبل از جریان یافتن نیاز به تخریب ژل دارد. چنین چیزی در مواد غذایی مانند کچاپ و مارگارین مشاهده شده است ( Zhong and

Daubert, 2013). اما تنش تسلیم مشاهده شده در این نمونه‌ها بسیار پایین بوده و می‌تواند نشانگر رفتار ویسکوز در آنها باشد. نمونه‌های با بریکس 45، 55 و 65 بخوبی با مدل هرشل بالکی و کراس ( از نرخ برشی صفر تا 300) برازش شدند. پارامترهای حاصل از این دو مدل در جدول 4 و 5 ارائه شده است

**جدول 3- میانگین پارامترهای حاصل از برازش مدل های نیوتنی و بینگهام بر نمونه های با بریکس 7، 25 و 35**

| بریکس | ویسکوزیته نیوتنی(Pa.s) | $R^2$ | RMSE | ویسکوزیته بینگهام(Pa.s) | تنش تسلیم بینگهام(Pa) | $R^2$ | RMSE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 0/0014308[a] | 0/993 | 0/037 | 0/0013975[a] | 0/000046813 [a] | 0/996 | 0/031 |
| 25 | 0/006324[b] | 0/939 | 0/125 | 0/0060844[b] | 0/000029426[a] | 0/960 | 0/112 |
| 35 | 0/013227[c] | 0/926 | 0/188 | 0/012724[c] | 0/000055127[a] | 0/951 | 0/169 |

میانگین‌هایی که با حروف کوچک یکسان نشان داده شده‌اند، بر اساس ازمون LSD در سطح 0/05 با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند.

**جدول 4- میانگین پارامترهای حاصل از برازش مدل هرشل بالکی بر نمونه های با بریکس 45، 55 و 65**

| بریکس | تنش تسلیم (Pa) | ضریب قوام ($pa.s^n$) | اندیس جریان (بدون بعد) | $R^2$ | RMSE |
|---|---|---|---|---|---|
| 45 | 0/00012[a] | 0/0327[a] | 0/96[a] | 0/999 | 0/110 |
| 55 | 0/00125[b] | 0/297[b] | 0/91[b] | 0/999 | 0/251 |
| 65 | -0/00056[c] | 1/30[c] | 0/91[b] | 0/984 | 1/048 |

میانگین‌هایی که با حروف کوچک یکسان نشان داده شده‌اند، بر اساس ازمون LSD در سطح 0/05 با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند.

**جدول 5- میانگین پارامترهای حاصل از برازش مدل کراس بر نمونه‌های با بریکس 45، 55 و 65**

| بریکس | P(بدون بعد) | C (s) | ویسکوزیته در نرخ برشی صفر(Pa.s) | ویسکوزیته در نرخ برشی بی‌نهایت (Pa.s) | $R^2$ | RMSE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 45 | 0/01 [a] | 2125/1[a] | 0/01732[a] | 0/018459[a] | 0/987 | 0/025 |
| 55 | 0/01 [a] | 2892/7[b] | 0/04383[b] | 0/062777[b] | 0/935 | 0/128 |
| 65 | 0/2394[b] | 0/058088[c] | 2/104[c] | $8/2913\times10^{-8}$[c] | 0/997 | 0/060 |

میانگین‌هایی که با حروف کوچک یکسان نشان داده شده‌اند، بر اساس ازمون LSD در سطح 0/05 با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند.

مدل هرشل بالکی، با وجود ضریب تبیین بالا، جذر میانگین خطای بالاتری نسبت به مدل کراس داشته است. علاوه بر این، پارامتر تنش تسلیم برای نمونه با بریکس 65 منفی بوده است که از لحاظ رئولوژیکی بی‌معنی است. بنابراین مدل هرشل بالکی مدل مناسبی نیست. بنابراین می‌توان مدل کراس را بخاطر داشتن ضریب تبیین بالا، جذر میانگین خطا پایین و پارامترهای با مفهوم، مدل برتر برای نمونه‌ها با بریکس 45، 55 و 65 معرفی کرد. در بررسی رفتار رئولوژیکی کنسانتره آب انبه در غلظت‌های مختلف مواد جامد 7/6-26 %، نیز نمونه‌ها رفتار رقیق‌شونده با برش را نشان دادند (Dak *et al.*, 2007). رفتار غیرنیوتنی رقیق‌شونده با برش در کنسانتره آب پوملو نیز گزارش شده است و با افزایش غلظت رفتار رقیق‌شوندگی با برش افزایش یافت (Chin *et al.*, 2009). همچنین، در بررسی خواص رئولوژیکی آب نارنج نیز نتایج نشان داده شد، با افزایش غلظت ویسکوزیته نمونه‌ها افزایش می‌یابد و نمونه‌ها رفتار رقیق‌شوندگی با برش را از خود نشان می‌دهند (نصیری و همکاران، 1393). در بررسی خواص رئولوژیکی کنسانتره کیوی در غلظت‌های مختلف نیز نمونه‌ها رفتار رقیق‌شوندگی با برش داشتند و ویسکوزیته با کاهش مواد جامد کاهش یافت (Goula and Adamopoulos, 2012). با استفاده از مدل کراس، مقادیر ویسکوزیته در نرخ‌های برشی بی‌نهایت و صفر بدست آمد. با افزایش بریکس مقادیر ویسکوزیته در نرخ برشی صفر افزایش یافت. مقادیر ویسکوزیته در نرخ‌های برشی بی‌نهایت، برای نمونه با بریکس 65 بسیار کوچک است. افزایش ویسکوزیته در نرخ‌های برشی بی‌نهایت و صفر در مدل کراس با افزایش بریکس را می‌توان به افزایش در غلظت پکتین و همچنین حضور قند نسبت داد. افزایش ویسکوزیته در نرخ برشی پایین در مدل کراس می‌تواند به اثرات متقابل بین ذرات کوچک در نتیجه نیروهای واندروالسی و یا نیروهای الکترواستاتیک بین پکتین با بار منفی و پروتئین با بار مثبت باشد. در حالیکه در نرخ‌های برشی بالا نیروهای هیدرودینامیک بر رئولوژیکی سیال موثر می‌شود (do Nascimento *et al.*, 2016). با بررسی ساختار در طی کاهش نرخ برشی از 300 به صفر، نمونه کنترل به مقدار جزئی رفتار رئوپکتیک نشان داد (-0/29 Pa/s). میزان هیسترسیس Pa/s 0/67، 0/09، 1/76، 50/41 و 310/47 به‌ترتیب در بریکس‌های 25، 35، 45، 55 و 65 بدست آمد ($p<0/05$). با توجه به میزان کم هیسترسیس در بریکس‌های پایین، ویسکوزیته این

نمونه‌ها بین شکل افزایش نرخ برشی و کاهش نرخ برشی تفاوت زیادی نداشت. بریکس‌های بالاتر (55و 65) میزان هیسترسیس بیشتری داشته‌اند. افزایش میزان ناحیه هیسترسیس نشان‌دهنده افزایش میزان وابستگی به زمان است. بنابراین، نمونه‌ها در بریکس‌های بالاتر رفتار تیکسوتروپی بیشتری نشان داده‌اند. رفتار تیکسوتروپی ممکن است به دلیل ساختار داخلی آب‌میوه که توسط برهمکنش‌های فیزیکی بین مواد جامد محلول، قندها و خصوصا پروتئین‌ها تشکیل شده است، باشد. برخی محققین دیگر نیز رفتار تیکسوتروپی کنسانتره کیوی (Goula and Adamopoulos, 2012)، کران بری (Peleg and Noble, 1999) و پالپ گوجه‌فرنگی (Abu-Jdauyil *et al.*, 2004) را گزارش نمودند.

## آزمون روبش کرنش

طبق شکل 1 با افزایش بریکس مقادیر هر دو مدول ویسکوز و الاستیک افزایش یافت ($p<0/05$). در واقع می‌توان گفت با افزایش بریکس خصوصیت ویسکوالاستیسیته افزایش می‌یابد. تقریبا برای کلیه نمونه‌ها، مقادیر مدول الاستیک و ویسکوز در دامنه کرنش 0/01 تا 100 % ثابت بوده است. از طرف دیگر مقادیر ویسکوز در کلیه نمونه‌ها بیشتر از مقادیر الاستیک بوده است که نشان‌دهنده این است کنسانتره لیمو یک مایع ویسکوالاستیک (مقدار فاکتور میرایی بیشتر از 1) است.

## آزمون روبش فرکانس

آزمون نوسانی برای مطالعه پایداری نمونه‌ها در روش غیرمخرب انجام شد (شکل 2). این تکنیک اطلاعات مفیدی برای توسعه شبکه و تغییرات میکروساختار در طول زمان ارائه می‌دهد. در تمامی محدوده فرکانس مورد آزمون، مقادیر مدول ویسکوز بالاتر از الاستیک بود. در نمونه‌ها با بریکس 55 و 65، هر دو مدول الاستیک و ویسکوز تابع فرکانس بوده و با افزایش فرکانس مقادیر آنها افزایش می‌یابد ($p<0/05$). همچنین در محدوده فرکانس مورد مطالعه هیچ برخوردی میان دو مدول دیده نشد.

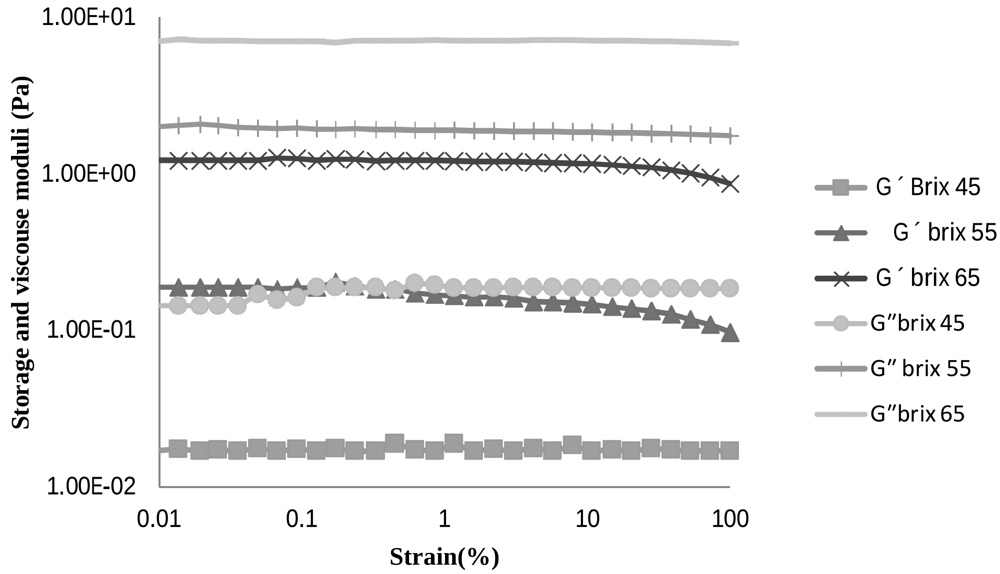
این رفتار از لحاظ رئولوژیکی به‌عنوان یک ماده رقیق شناخته می‌شود. یک راه برای تشخیص دیسپرسیون پایدارتر، مقایسه مدول الاستیک در فرکانس‌های بالاست. نمونه با بریکس 65 مدول الاستیک بیشتری در فرکانس‌های بالا داشته است. در مطالعه Giacomazza و همکاران (2016) نشان داده شد، در فرکانس ثابت مقادیر مدول ویسکوز و الاستیک با افزایش غلظت پکتین افزایش می‌یابد. علاوه بر این در مطالعه آنها مشخص شد که با افزایش غلظت پکتین، مقدار مدول‌ها با افزایش فرکانس بیشتر می‌شود. در مطالعه حاضر، نسبت افزایش مدول ویسکوز بیشتر از مدول الاستیک بود. اما در مطالعات Giacomazza و همکاران (2016) در سیستم‌های حاوی 0/5 درصد پکتین، مدول الاستیک افزایش بیشتری را نسبت به مدول ویسکوز نشان داد. آنها مشاهده نمودند، در هر فرکانسی مقدار مدول الاستیک در آغاز کمتر از مدول ویسکوز بوده است اما با سرعت بیشتر از مدول ویسکوز افزایش می‌یابد. هر دو مدول با گذشت زمان به یک نقطه تلاقی رسیده و سرانجام به یک مقدار مستقل از فرکانس می‌رسد.

در مطالعه حاضر، به دلیل بالاتر بودن مدول ویسکوز از مدول الاستیک در کل دامنه فرکانس مورد مطالعه هیچ مدرکی برای تشکیل ژل وجود ندارد. آبلیمو حاوی مقدار زیادی پکتین است. پکتین، پلی‌ساکاریدی هتروژن و منشعب است. پکتین با متوکسیل بالا در pH اسیدی تنها در حضور مقدار زیادی ساکارز یا دیگر کمک حلال‌ها تشکیل شبکه سه‌بعدی می‌دهد و مکانیسم ژله‌ای شدن آن هنوز به‌طور کامل درک نشده است (do Nascimento *et al.*, 2016). pH نقش بحرانی را در صورت‌بندی پکتین بازی می‌کند. از طرفی بار منفی پکتین باعث می‌شود در حالت اسیدی ساختار باز شود و از طرف دیگر در حالت اسیدی هیدرولیز در پلی‌ساکاریدها رخ می‌دهد. احتمالا ناتوانی برای تشکیل شبکه بخاطر سیالیت مولکولی در ماتریکس شبکه است (do Nascimento *et al.*, 2016). در واقع به علت پایین بودن غلظت پکتین و ساکارز در بریکس‌های پایین ، ژل تشکیل نشده اما با افزایش بریکس که مطابق با آن غلظت پکتین و ساکارز بیشتر می‌شود، توانایی برای تشکیل ژل بیشتر می‌شود. اگرچه در هیچکدام از نمونه‌ها ژل تشکیل نشد.

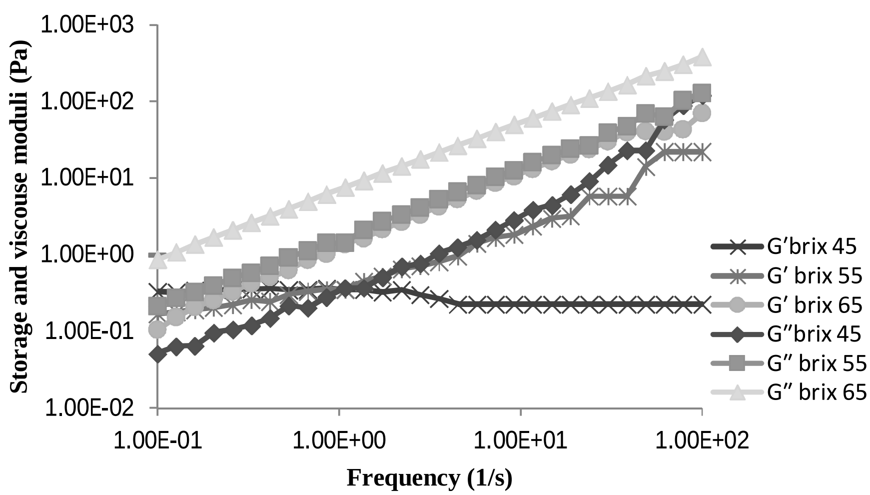
وابستگی مدول ویسکوز به فرکانس در دامنه 0/161 هرتز تا 117 هرتز ، در سه نمونه با بریکس 45، 55 و 65، به‌خوبی با مدل قانون توان برازش شدند. نتایج در جدول6 گزارش شده است.

ضریب a با افزایش بریکس افزایش و ضریب b با افزایش بریکس از 45 به 55 افزایش و با افزایش بریکس از 55 به 65 کاهش یافت ($p<0/05$). پارامتر a به ثابت معادله و پارامتر b به توان فرکانس (هر چقدر توان فرکانس کمتر باشد، مقدار مدول ویسکوز به‌صورت کندتری با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد) اشاره می‌کند (Wang *et al.*, 2009). طبق شکل 2، افزایش بریکس موجب افزایش مدول ویسکوز شده است و بنابر جدول 6، با افزایش بریکس پارامتر a افزایش و پارامتر b کاهش می‌یابد که می‌تواند به افزیش غلظت پکتین نسبت داده شود. مشاهده ما مشابه نتایج Wang و همکاران (2009) بوده است. آنها گزارش کردند، افزودن هیدروکلوئید زانتان مقادیر پارامتر b را به‌طور واضحی کاهش می‌دهد. آنها نتیجه گرفتند، مقادیر مدول ویسکوز با افزایش فرکانس به‌طور کندتری با افزودن صمغ زانتان افزایش می‌یابد. گفته شده است با افزایش غلظت قند، مقدار b افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش قند سوکروز، خصوصیت جامد مانند (Solid like) و پایداری کاهش می‌یابد

(Wang *et al* 2009). بنابراین علت اصلی کاهش مقدار b با افزایش بریکس ، افزایش غلظت پکتین است.




**شکل 1- وابستگی مدول ویسکوز و الاستیک به کرنش در نمونه‌ها با بریکس 45، 55 و 65**




**شکل 2- وابستگی مدول الاستیک و ویسکوز به فرکانس در نمونه‌های با بریکس 45، 55 و 65**

**جدول 6- میانگین پارامترهای a و b حاصل از برازش قانون توان بر مقادیر مدول ویسکوز در دامنه فرکانس مورد مطالعه**

| بریکس | ضریب a | ضریب b | $R^2$ | RMSE |
|---|---|---|---|---|
| 45 | 0/026122[a] | 1/0296[a] | 0/972 | 0/211 |
| 55 | 0/28379[b] | 0/92386[b] | 0/990 | 0/327 |
| 65 | 1/3846[c] | 0/88526[c] | 0/999 | 0/274 |

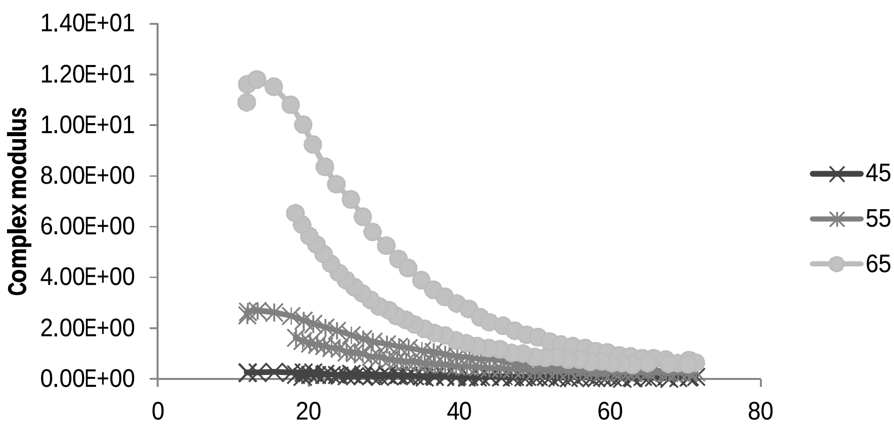
میانگین‌هایی که با حروف کوچک یکسان نشان داده شده اند، بر اساس ازمون LSD در سطح 0/05 با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند.

افزایش ضریب a با افزایش بریکس نشان می‌دهد که وابستگی مدول ویسکوز به فرکانس با افزایش بریکس، افزایش می‌یابد که می‌تواند به افزایش غلظت پکتین نسبت داده شود. Wang و همکاران نیز در سال 2009 به افزایش ثابت a با افزودن صمغ زانتان در نتیجه

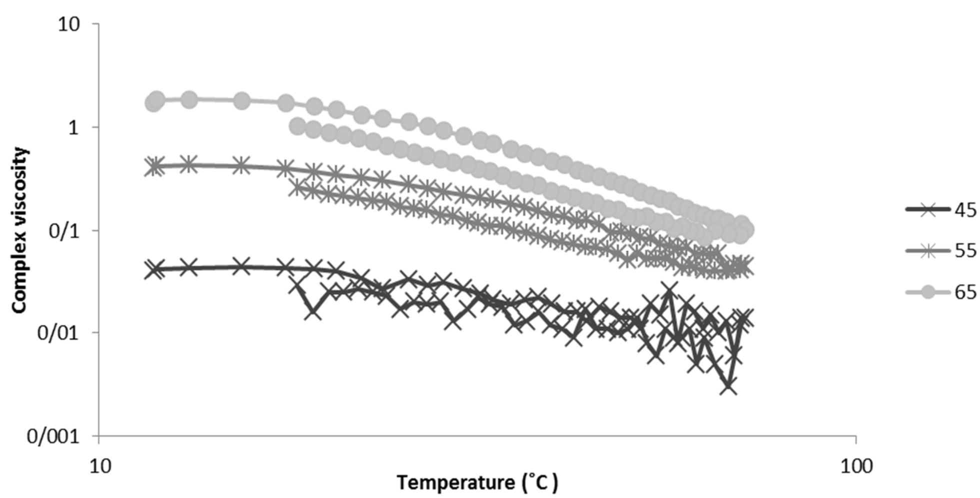
افزایش در استحکام فاز پیوسته سیستم به خاطر اثـر غلـیظ‌کننـدگی صمغ زانتان اشاره نمودند.

**آزمون روبش دما**

در کل دامنه دمایی مورد مطالعه ویژگی ویسـکوز برجسـته‌تـر از ویژگی الاستیک بود. نمودارهای مربوطه نشان داده نشده‌اند. در طول تیمار حرارتی تغییرات ساختاری رخ داد. در دماهای بالاتر مقادیر مدول الاستیک و ویسکوز به یکدیگر نزدیک شـدند. شـیب نمـودار مـدول الاستیک در طی افزایش دما کاهش و سپس در طی کـاهش دمـایی مجددا افزایش یافت که نشان می‌دهد، مجددا پیوندهای بین مولکولی تقویت می‌شوند. تغییر شیب، برای نمونه با بـریکس 65 بیشـتر بـود. مدول الاستیک بیشتر از مدول ویسکوز تحت تاثیر حرارت قرار گرفت. مقادیر مدول ویسکوز نیز در کل دامنه دمایی مورد مطالعه برای نمونه 65 بیشتر بوده و نمونه‌ها با بریکس 55 و 45 به‌ترتیب در مراتب بعدی قرار داشتند. شیب نمودار مدول ویسکوز نیز برای نمونه 65 بیشـتر و برای نمونه 45 کمترین بود ($p<0/05$) طبق شکل‌های 3 و 4، در کل دامنه دمایی مورد مطالعه، مدول کمـپلکس و ویسـکوزیته کمـپلکس به‌ترتیب در نمونه 65، 55 و 45 بیشتر بود ($p<0/05$).




**شکل 3- وابستگی مدول کمپلکس به دما در نمونه‌ها با بریکس 45، 55 و 65**




**شکل 4- وابستگی ویسکوزیته کمپلکس به دما در نمونه‌ها با بریکس 45، 55 و 65**

شیب تغییرات در نمونه 65 بیشتر و در نمونه 45 کمتـر بـود. بـا افزایش دما مقدار هر دو پارامتر کاهش یافت. کاهش هر دو مـدول و ویسکوزیته کمپلکس با افزایش دما نشان‌دهنـده ایـن اسـت کـه بـا افزایش دما مقاومت ماده به جریان کاهش می‌یابد. افـزایش در دمـا، افزایش در انرژی حرارتی مولکـول‌هـا و انبسـاط را در پـی دارد و در نتیجه موجب افزایش فاصله بـین مولکـولی و کـاهش نیـروی بـین مولکـولی مـی‌شـود (Arslan *et al.*, 2005). بنـابراین، ویژگـی ویسکوالاستیسیته و همچنین ویسکوزیته کمپلکس کاهش می‌یابد.

با افزایش بریکس، مساحت حلقه هیسترسیس تشکیل شده بین تخریب ساختار در طی افزایش دما و تشکیل مجدد ساختار در طی کاهش دما، افزایش می‌یابد(شکل 3). یعنی توانایی در بازگشت ساختار در طی کاهش دما، با افزایش بریکس، کاهش یافت. بنابراین، می‌توان گفت، اگرچه مدول ویسکوز و الاستیک در طی کاهش دما نیز برای نمونه با بریکس 65 بیشتر از نمونه‌ها با بریکس 55 و 45 بود اما توانایی در بازیافت ساختار برای نمونه با بریکس 65 کمتر از دو نمونه دیگر بود.

## نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد، کنسانتره نمونه با بریکس 25 و 35 همانند نمونه کنترل رفتار نیوتونی دارند. اما نمونه‌ها با بریکس 45، 55 و 65 رفتار رقیق‌شونده با برش و تیکسوتروپ دارند. این نمونه‌ها برازش خوبی با مدل کراس داشتند. همچنین در آزمون نوسانی مشخص شد، نمونه‌ها رفتار مایع ویسکوالاستیک دارند و از آنجا که با افزایش فرکانس مقادیر هر دو مدول ویسکوز و الاستیک افزایش یافت ولی هیچ برخوردی در کل دامنه فرکانس مشاهده نشد، ماده رقیق بوده است و ژلی تشکیل نشده است. در کل دامنه دمایی مورد مطالعه، نمونه با بریکس 65 بیشترین و نمونه با بریکس 45 کمترین مقادیر مدول کمپلکس، مدول ویسکوز و الاستیک و ویسکوزیته کمپلکس را دارا بود. با افزایش دما مقدار هر چهار پارامتر کاهش یافت. با افزایش بریکس مقدار ناحیه بازگشت ساختار در طی کاهش دما، افزایش می‌یابد. یعنی ساختار نسبت به نمونه اولیه در طی کاهش دما ضعیف‌تر شد. این اطلاعات رئولوژیکی و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی می‌تواند در افزایش مقیاس و بهینه‌سازی فرآیند، حمل و نقل و نگهداری کنسانتره لیمو به جهت کاربردهای تجاری مهم باشد.

## منابع


Abu-Jdayil, B., Banat, F., Jumah, R., Al-Asheh, S., & Hammad, S. 2004. A comparative study of rheological characteristics of tomato paste and tomato powder solutions. *International Journal of Food Properties*, 7(3), 483-497.

Alemzadeh, T., Mohammadifar, M.A., Azizi, M.H., & Ghanati, K. 2009. Effect of two different species of Iranian gum tragacanth on the rheological properties of mayonnaise sauce (65 % fat) [dissertation]. Tehran: The International & Virtual Branch of ShahidBeheshti University of Medical Sciences & Health Services, [in Persian].

Arslan, E., Yener, M. E., & Esin, A. 2005. Rheological characterization of tahin/pekmez (sesame paste/concentrated grape juice) blends. *Journal of Food Engineering*, 69(2), 167-172.

Augusto, P. E., Ibarz, A., & Cristianini, M. 2012. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the rheological properties of a fruit juice serum model. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 474-477.

Avila, I. M. L. B., & Silva, C. L. M. 1999. Modelling kinetics of thermal degradation of colour in peach puree. *Journal of food engineering*, 39(2), 161-166.

Awolu, O. O., Aderinola, T. A., & Adebayo, I. A. 2013. Physicochemical and Rheological Behavior of African Star Apple *Chrysophyllum Albidium*) Juice as Affected by Concentration and Temperature Variation. J*ournal of Food Processing & Technology*, 2013, 4, 1-6.

Braccini, I., Rodríguez-Carvajal, M. A., & Pérez, S. 2005. Chain-chain interactions for methyl polygalacturonate: models for high methyl-esterified pectin junction zones. *Biomacromolecules*, 6(3), 1322-1328.

Caristi, C., Bellocco, E., Panzera, V., Toscano, G., Vadala, R., & Leuzzi, U. 2003. Flavonoids detection by HPLC-DAD-MS-MS in lemon juices from Sicilian cultivars. *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(12), 3528-3534.

Chin, N. L., Chan, S. M., Yusof, Y. A., Chuah, T. G., & Talib, R. A. 2009. Modelling of rheological behaviour of pummelo juice concentrates using master-curve. *Journal of Food Engineering*, 93(2), 134-140.

Dak, M., Verma, R. C., & Jaaffrey, S. N. A. 2007. Effect of temperature and concentration on rheological properties of “Kesar” mango juice. *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1011-1015.

Do Nascimento, G. E., Simas-Tosin, F. F., Iacomini, M., Gorin, P. A. J., & Cordeiro, L. M. 2016. Rheological behavior of high methoxyl pectin from the pulp of tamarillo fruit (*Solanum betaceum*). *Carbohydrate polymers*, 139, 125-130.

Khalili Garakani, A.H., Mostoufi, N., Sadeghi, F., Hosseinzadeh, M., Fatourechi, H., Sarrafzadeh, M.H.,& Mehrnia, M.R. 2011. Comparison between different models for rheological characterization of activated sludge. Iranian *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 8(3),255-264.

Giacomazza, D., Bulone, D., San Biagio, P. L., & Lapasin, R. 2016. The complex mechanism of HM pectin self-assembly: A rheological investigation. *Carbohydrate polymers*, 146, 181-186.

Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. 2012. Rheological models of kiwifruit juice for processing applications. *Journal of Food Processing & Technology*, 2, 1- 7.

Gratão, A. C. A., Silveira, V., & Telis-Romero, J. 2006. Laminar forced convection to a pseudoplastic fluid food in

circular and annular ducts. *International communications in heat and mass transfer*, 33(4), 451-457.

Ibarz, A., Pagan, J., Gutierrez, J., & Vicente, M. 1989. Rheological Properties of Clarified Pear Juice Concentrates. *Journal of Food Engineering*, 10, 57-63.

ISIRI.1999, Fruit juices – Test methods. ISIRI no 2685. 1st.revision. Karaj,. Iran [in Persian].

Jesus, D. F., Leite, M. F., Silva, L. F. M., Modesta, R. D., Matta, V. M., & Cabral, L. M. C. 2007. Orange (Citrus sinensis) juice concentration by reverse osmosis. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 287-291.

Kimball, D., Parish, M.E., & Braddock, R. 2004. Oranges and tangerines. In: Processing Fruits. CRC Press, USA, 619-641.

Lozano, J.E. 2006. Chemical composition of fruits and its technological importance. In: Fruit Manufacturing. *Springer*, USA, 133–161.

Magerramov, M. A., Abdulagatov, A. I., Azizov, N. D., & Abdulagatov, I. M. 2007. Effect of temperature, concentration, and pressure on the viscosity of pomegranate and pear juice concentrates. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 476-489.

Martinez, M. V., & Whitaker, J. R. 1995. The biochemistry and control of enzymatic browning. T*rends in Food Science & Technology*, 6(6), 195-200.

Nasiri, M., Farahnaky, A., Niakousari, M., Majzoobi, M., & Masbahi, Gh. 2014. Evaluation of processing condition on physicochemical properties and flow behavior of sour orange juice concentrate. *Iranian Journal of Food Research*, 24 (2): 155-166 [in Persian].

Peleg, H., & Noble, A. C. 1999. Effect of viscosity, temperature and pH on astringency in cranberry juice. *Food quality and preference*, 10(4), 343-347.

Ranganna, S., Govindarajan, V. S., Ramana, K. V. R., & Kefford, J. F. (1983). Citrus fruits—Varieties, chemistry, technology, and quality evaluation. Part II. Chemistry, technology, and quality evaluation. A. Chemistry. Critical *Reviews in Food Science & Nutrition*, 18(4), 313-386.

Rao, M.A. 2014. Flow and functional models for rheological properties of fluid foods. In Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods .*Springer*, US, 27-61.

Rattanathanalerk, M., Chiewchan, N., & Srichumpoung, W. 2005. Effect of thermal processing on the quality loss of pineapple juice. *Journal of Food engineering* 66(2), 259-265.

Sharma, S. K., LeMaguer, M., Liptay, A., & Poysa, V. 1996. Effect of composition on the rheological properties of tomato thin pulp. *Food Research International*, 29(2), 175-179.

Touhami, M., Laroubi, A., Elhabazi, K., Loubna, F., Zrara, I., Eljahiri, Y., & Chait, A. 2007. Lemon juice has protective activity in a rat urolithiasis model. *BMC urology*, 7(1), 1-10.

Wang, B., Wang, L-J., Li, D., Özkan, N., Li, S-J., & Mao, Z-H. 2009. Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose. Carbohydrate Polymers, 77(3),472-81.

Williams, PA. & Phillips, GO.2000. Introduction of food hydrocolloids. In: Hand book of food hydrocolloids. CRC Press, *Cambridge*, 1-22.

Zargari, A.1989. Medicinal Plants. University of Tehran Press, Iran, 1,488.

Zhong Q, & Daubert C R.2013. Food rheology. In :Handbook offarm, dairy and food machinery engineering. *Academic Press*, New York, 403–426.

**Iranian Food Science and Technology Research Journal**
**Vol. 14, No. 1, Apr. May. 2018, p. 119- 131**

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 14، شماره 1، فروردین-اردیبهشت 1397 ص.131-119

# Effect of concentration on the rheological and physicochemical properties of lemon juice

**A. Motamedzadegan[1*], E. Omidbakhsh Amiri[2], M. Jamshidi[2], T. Khosravi rad[3]**

Received: 2016.10.08
Accepted: 2017.05.08

**Introduction:** In industrial operations, a product is submitted to a range of shear rates. The knowledge of the changes in rheology with temperature, frequency and shear rate is needed to design the equipment of operations. The lemon juice is used extensively in the food industry. Information about rheological and physicochemical properties is important for scale up and optimization of processes such as transport and storage of concentrated lemon in commercial applications. The aim of this study was toevaluate the rheological and physicochemical properties of the concentrated lemon produced using vacuum evaporator.

**Materials and Methods**: Lemon juice was concentrated to 25, 35, 45, 55 and 65 Brix by a rotary evaporator under vacuum at 65°C. The content of soluble solids in terms of brix using refractometer, pH, acidity in terms of citric acid, color in terms of a* , b* and L*, flow behavior and viscoelasticity as function of strain, frequency and temperature using rheometer were investigated. Mean comparison carried out using the least significant difference.

**Results&Discussion**: As brix increased, pH reduced and acidity increased. An increase in the concentration resulted in a decrease in L* and b* parameters and an increase in a* parameter. Enzymatic browning in this study could be ignored due to the sensitivity of enzymes to temperatures above 50°C. Millard's non-enzymatic browning (formation of hydroxyl methyl furfural and its polymerization) and the degradation of pigments might be a major contributor to color variation, although a decrease in moisture content and an increase in soluble solids are other reasons for darkening of color. Based on coefficient of determination ($R^2$) and root mean square error (RMSE), we could state that the Newtonian and Bingham models had the best fit with laboratory data of the stress-strain obtained for the control sample with the 7Brix, and the samples with 25 and 35 Brix. Newtonian and Bingham viscosity increased as brix increased ($p<0.05$). However, the observed yield stress in these samples is very low and can be indicative of their viscous behavior. **Herschel**-Bulkley model, despite it had the high $R^2$, had a higher RMSE than the cross model. In addition, the yield stress for the sample with 65 brix was a negative number, which is meaningless rheologically. Therefore, the Herschel-Bulkley model is not a suitable model. Therefore, the cross model with high $R^2$, low RMSE and concept parameters was superior model for samples with 45, 55 and 65 brix. Using cross model, viscosity values were obtained at infinite and zero shear rates. As brix increased, viscosity values increased at zero shear rates. The viscosity values at infinite shear rates were very small in 65 brix. The increase in viscosity at infinite and zero shear rates with increasing of brix can be attributed to an increase in pectin concentration and also the presence of sugar. Increasing in viscosity at low shear rates in the cross model can be due to interactions between small particles as a result of van der waals forces or electrostatic forces between negatively charged pectins and positively charged proteins. At high shear rates, hydrodynamic forces are effective on the rheological fluid. The area of the hysteresis ring was very small in samples with low brix. Higher brixes (55 and 65) indicated higher hysteresis. Increasing in the hysteresis indicates an increase in the time dependence. Therefore, samples showed higher thixotropic behavior in higher brixs. Thixotropic behavior may be due to the internal structure of juice that is formed by physical interactions between soluble solids, sugars and proteins. In strain sweep, with increasing of the brix, the values of both viscous and elastic modules increased ($p<0.05$). In frequency and strain sweep, viscose modulus was greater than the elastic modulus and was not observed any crossover between them. This behavior is an indicative of dilute material. In acidic state, hydrolysis of polysaccharides is a barrier in formation of a network due to molecular

1. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Mazandaran, Iran. Po Box 578.
2. PhD student of Food Science and Technology, Department of Food Science and Technology, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Mazandaran, Iran. Po Box 578.
3. M.S. In Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University
(*Corresponding Author Email: amotgan@yahoo.com)

fluidity in the matrix. In fact, due to the low concentration of pectin and sucrose in the low brixes, the gel is not formed, but with the increase of the brix, which increases the concentration of pectin and sucrose, the ability in formation of gel increased. However, no gel was formed in any of the samples. The dependence of the viscous modulus on the frequency in the range of 161 0 Hz to 117 Hz, in three samples with 45, 55 and 65 brix, fit well with the power law model. Model parameters showed the dependence of the viscous modulus on the frequency increased with increasing of brix, which can be attributed to an increase in the concentration of pectin. In total amplitude of temperature, viscose modulus was greater than the elastic modulus. Complex modulus and complex viscosity increased in samples as brix increased. Reducing of viscose and elastic modules and complex viscosity with increasing in temperature indicates that the material's resistance to flow decreases with increasing temperature. As the brix increased, the area of the hysteresis loop between the structural destruction and the formation of the structure increased. That is, the ability of the structure return decreased with increasing in brix during decreasing of temperature.

**Keywords:** Lemon juice, Physicochemical properties, Rheological properties